

ЯВЛЕНИЕ САМОНАГРЕВА ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

Анохин А.М.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
amanohin@mail.ru

Аннотация: Разработка систем автоматизации, их производство и эксплуатация сопряжены с потребностью в многочисленных измерениях различных физических величин. От быстроты и правильности проводимых измерений зависит качество и надежность функционирования создаваемых систем, сроки их разработки, а также затраты на изготовление и эксплуатацию. Измерение – это самый сложный вид восприятия и обработки исходной информации. Совершенствование методов обработки информации и метрологических показателей электронно-измерительной техники не в последнюю очередь связано с устранением многочисленных внешних воздействий на первичные преобразователи–датчики и в первую очередь – теплового.

Ключевые слова: самонагрев, сенсорезистор, тепловые потери, ошибки измерений.

Введение

Явление самонагрева (перегрева) первичного преобразователя рабочим измерительным током вызывает ухудшение качества метрологических характеристик датчика-измерителя в трех главных аспектах:

- дестабилизирует статическую характеристику преобразователя (СХП), т.е. – смещает СХП из одного (нормального) температурного режима в другой, соответствующий режиму перегрева;
- увеличивает инерционность процесса преобразования, т.е.– за счет перегрева увеличивает постоянную времени выхода теплового режима системы преобразователь - среда на другой стационарный уровень;
- снижает метрологическую надежность СИ, т.е. – ускоряет деградиационные процессы теплового старения и интенсифицирует поток отказов, уменьшая время наработки на отказ.

Сенсорезистивный преобразователь любого вида является токовым прибором, выделяющим определенную мощность самонагрева, и вследствие этого как всякий токовый прибор подвержен в своей работе дестабилизирующему влиянию температуры перегрева. Соответственно этому влиянию появляются трудноустраняемые инструментальные и методические составляющие систематической погрешности измерения.

Наиболее востребованы в народном хозяйстве и выпускаются промышленностью в наибольших масштабах датчики-измерители, построенные на основе сенсорезистивного эффекта. *Сенсорезистивный эффект* – это эффект изменения электропроводности специализированных полупроводниковых материалов под воздействием той или иной физической величины. Видовое многообразие полупроводниковых сенсорезисторов образует многочисленный ряд, в который

входят: терморезисторы, фоторезисторы, тензорезисторы, магниторезисторы, тактильные сенсорезисторы, гигристоры (чувствительные к влажности), сенсорезисторы избирательные к газовому составу и сенсорезисторы других видов. В свою очередь каждый вид может быть представлен еще более многочисленным типовым рядом, отличительные особенности элементов которого обусловлены конкретикой их целевого назначения. В видовом ряду электронных измерений температурные измерения следует признать одними из самых востребованных и вместе с тем методологически сложно реализуемых. Такая востребованность обусловлена фактором доминирования теплового влияния на все процессы, происходящие как в природной, так и в технологической среде.

1 Моделирование эффекта самонагрева

Рассмотрим процесс самонагрева первичного преобразователя с позиций тепловой динамики. Приведем аналитическое описание процесса измерительного преобразования – интенсивность теплового воздействия в измерительный сигнал на примере использования в качестве первичного преобразователя полупроводникового терморезистора (термистора) и оценим влияние на результат измерения негативного эффекта самонагрева преобразователя [1].

Как упоминалось ранее, явление самонагрева оказывает влияние на его рабочие характеристики. Термисторы относятся к датчикам для работы которых требуется сигнал возбуждения. Этим сигналом, как правило, служит либо постоянный, либо переменный ток, протекающий через термистор, который приводит к выделению тепла и разогреву чувствительного элемента. Это повышение температуры первичного преобразователя приводит к появлению погрешностей при измерении температуры объекта. Правда, в некоторых случаях явление самонагрева используется для построения датчиков, реагирующих на изменения тепловых потоков, а также ИК излучений и других внешних воздействий.

Рассмотрим процессы, проходящие в термисторах, при подаче на них электрического напряжения. На рис. 1.А показана схема, состоящая из источника напряжения E , термистора R_T и внутреннего сопротивления источника R .

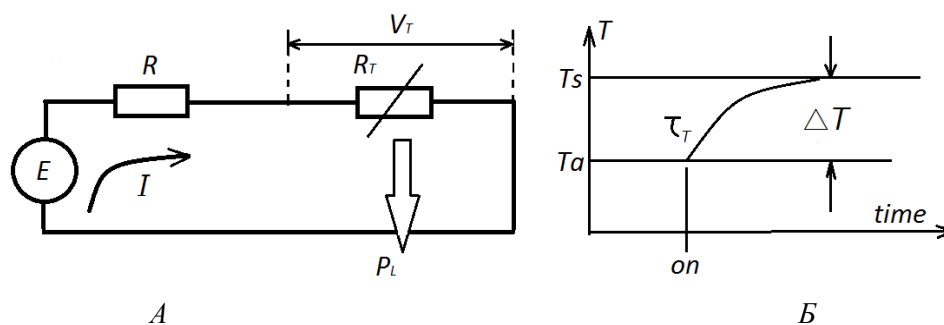


Рис.1.

А – ток, протекающий через термистор, вызывает его самонагрев,

Б – температура термистора увеличивается в соответствии с тепловой постоянной времени τ_T P_L - тепловые потери в окружающую среду.

При включении источника питания (момент ВКЛ на рис. 1.Б) в соответствии с законом сохранения энергии вся тепловая энергия схемы (А) должна равняться электрической мощности, вырабатываемой источником питания:

$$(1) \frac{dH}{dt} = P = \frac{V_T^2}{R_T} = V_T i$$

где V_T - падение напряжения на термисторе.

Тепловая энергия состоит из двух составляющих: тепловых потерь (H_L) в окружающую среду и тепловой энергии (H_S), поглощенной термистором. Поглощенная часть энергии накапливается в тепловой емкости C преобразователя. Тогда уравнение баланса мощности можно записать в следующем виде:

$$(2) \frac{dH}{dt} = \frac{dH_L}{dt} + \frac{dH_S}{dt}$$

Тепловые потери термистора в окружающую среду пропорциональны разности температур ΔT термистора T_s и окружающей среды T_a

$$(3) P_L = \frac{dH_L}{dt} = \delta \Delta T = \delta (T_s - T_a)$$

где δ - коэффициент рассеяния, равный отношению рассеиваемой мощности к градиенту температур (при известном значении температуры окружающей среды). Этот коэффициент зависит от конструкции датчика, длины и толщины проводов, материала термистора, опорных элементов, величины теплового излучения с поверхности термистора и относительного движения среды, в которую помещен термистор.

Скорость поглощения тепла термистором пропорциональна тепловой емкости преобразователя:

$$(4) \frac{dH_s}{dt} = C \frac{dT_s}{dt}$$

Именно это тепло приводит к повышению температуры термистора. Подставляя выражения (3) и (4) в уравнение (1), получим:

$$(5) \frac{dH}{dT} = P = Ei = \delta (T_s - T_a) + C \frac{dT_s}{dt}$$

Это дифференциальное уравнение описывает тепловое поведение термистора. Найдем решение этого уравнения для двух условий. Первое условие заключается в том, что электрическая мощность, приложенная к датчику, является постоянной величиной ($P = const$). Тогда решение уравнения (5) имеет следующий вид:

$$(6) \Delta T = (T_s - T_a) = \frac{P}{\delta} (1 - e^{-\delta t / C})$$

Из этого выражения видно, что температура датчика растет по экспоненциальному закону (рис. 1. Б), характеризуемому тепловой постоянной времени $\tau = C(1/\delta)$, где величина $1/\delta = r_T$ тепловое сопротивление между датчиком и окружающей средой. На рис. 1. Б показана экспоненциальная переходная характеристика.

Через достаточно большой интервал времени температура выйдет на стационарный режим, т.е. станет равной T_s , а $dT_s/dt = 0$. При этом тепловые потери и приложенная электрическая мощность сравняются друг с другом:

$$(7) \delta (T_s - T_a) = \delta \Delta T = V_T i$$

Если на термистор, обладающий большим сопротивлением, подать низкое напряжение, то ток, протекающий через него, будет также мал. Таким образом можно получить очень небольшой градиент температуры ΔT , что приведет к значительному уменьшению эффекта саморазогрева. Если саморазогревом термистора пренебречь, уравнение (5) можно переписать в виде:

$$(8) \frac{dT_s}{dt} = -\frac{\delta}{N} (T_s - T_a)$$

Решение этого уравнения описывается экспоненциальной функцией. Это значит, что выходной сигнал датчика отслеживает изменения окружающей температуры с некоторой постоянной времени τ_T . Поскольку эта постоянная времени зависит от связи термистора с окружающей средой, она, как правило, определяется для конкретных условий. Например, $\tau_T = 1c$ при температуре 25 °C в не возмущенном воздухе или $\tau = 0.1c$ при $T=25$ °C в хорошо перемешанной воде. Следует всегда помнить, что все вышеприведенные уравнения соответствуют упрощенной модели тепловых потоков. На самом деле, выходной сигнал термистора никогда не бывает строго экспоненциальным.

При разработке датчиков на основе термисторов всегда используется одна из его трех основных характеристик [2]:

1. Зависимость сопротивления от температуры. В датчиках, реализованных на основе этой зависимости, эффект самонагрева, практически, отсутствует. При этом необходимо выбирать термисторы с высоким номинальным сопротивлением, а конструкция детектора

должна обеспечивать максимальную связь чувствительного элемента с объектом измерения. Данная характеристика используется, в основном, для построения детекторов температуры. Термометры, термостаты и тепловые прерыватели являются примерами применения этой зависимости.

2. Зависимость тока от времени (или сопротивления от времени). На рис. 1.Б показан пример этой характеристики.
3. Зависимость напряжения от тока важна либо для детекторов, реализованных на основе явления саморазогрева, либо для датчиков, где этим эффектом пренебречь нельзя. Выражение (7) является уравнением баланса между приложенной электрической энергией и тепловыми потерями. При известной зависимости сопротивления от температуры и при незначительных изменениях ΔT (что справедливо для многих практических случаев), из уравнения (7) можно получить зависимость статического напряжения от тока.

При малых токах мощность рассеяния термистора мала и термистор ведет себя как обычный резистор, и напряжение V_T пропорционально току i .

При увеличении тока эффект самонагрева термистора усиливается, что ведет к уменьшению его сопротивления. Поскольку величина сопротивления перестает быть постоянной, характеристика $V_T(i)$ начинает отклоняться от прямой линии. Наклон этой зависимости (dV/di), соответствующий величине сопротивления, снижается при увеличении тока. Возрастание тока ведет к падению сопротивления, которое, в свою очередь, вызывает увеличение тока. В некоторой точке сопротивление термистора становится равным нулю. Эта точка характеризуется максимальным значением напряжения V_P и током i_P . Дальнейшее увеличение тока приводит к провалу напряжения, что означает уменьшение наклона характеристики. Это означает, что величина сопротивления становится отрицательной. Если ток продолжать увеличивать, начинают играть роль сопротивления соединительных проводов, поэтому никогда нельзя допускать работу термистора в таких режимах.

Как было отмечено ранее, наиболее применяемым видом термопреобразователей являются обычные металлооксидные термисторы, обладающие отрицательным температурным коэффициентом (ОТК). Сопротивление термисторов с ОТК, также, как и любых других резисторов, определяется их физическими размерами и удельным сопротивлением материала. Зависимость между величиной сопротивления и температурой нелинейна.

При проведении прецизионных измерений или при работе в широком температурном диапазоне нельзя напрямую использовать характеристики термисторов, приведенные в документации на них, поскольку типовые допуски на номинальные значения серийно выпускаемых изделий при температуре 25 °C составляют порядка $\pm 20\%$. Поэтому для достижения высокой точности измерений термисторы необходимо индивидуально калибровать в широком температурном диапазоне. Однако такая процедура настройки термисторов приводит к значительному повышению их стоимости. Поэтому на практике чаще применяется метод индивидуальной калибровки термисторов. В процессе калибровки измеряют сопротивление термистора при его помещении в среду с точно известной температурой. Если требуется многоточечная калибровка, эта процедура выполняется при разных температурах в калибровочном термостате. Для определения сопротивления термистор включается в измерительную цепь, по изменению тока в которой и судят о величине сопротивления. В зависимости от заданного уровня точности и стоимости калибровка термистора может проводиться на основе одной из известных аппроксимационных моделей [3].

При использовании термистора в качестве датчика абсолютной температуры предполагается, что при прохождении через него электрического тока, его собственная температура не изменится, что означает, что он не внесет в систему значительных тепловых возмущений, способных повлиять на точность измерений. В этом случае принято говорить, что термистор обладает «нулевой мощностью».

Увеличение температуры термистора в установившемся режиме вследствие явления самонагрева при циклическом прерывистом питании выражается формулой:

$$(9) \Delta T_H = r \frac{N^2 V^2}{S}$$

где r - тепловое сопротивление между термистором и окружающей средой, V - приложенное постоянное напряжение, R_T - сопротивление термистора при измеряемой температуре, N - рабочий цикл измерений. При проведении измерений по постоянному току $N = 1$.

Из уравнения (9) видно, что для выполнения условий «нулевой мощности» необходимо, чтобы:

- термистор обладал высоким удельным сопротивлением,
- термистор и объект измерения имели хорошую тепловую связь друг с другом (что должно снизить значение r),
- измерения проводились при небольшом постоянном напряжении, подаваемом в течение короткого интервала времени.

Отметим также, что термистор обладает лучшей чувствительностью на низких температурах, тогда как при увеличении температуры его чувствительность резко падает. Уравнение также показывает, насколько меняется сопротивление R_T при изменении температуры на один градус. Высокая чувствительность особенно важна для применений, требующих высоких значений выходного сигнала в относительно узком температурном диапазоне, например, в медицинском электронном термометре [4].

Для проведения прецизионных измерений используются термисторы только с отрицательным температурным коэффициентом.

2 Погрешности измерений, вносимые самонагревом

Самонагрев появляется в датчиках, первичные преобразователи которых нагреваются от сигнала возбуждения настолько, что это начинает влиять на его точностные характеристики. Например, прохождение измерительного тока через термисторный преобразователь приводит к выделению тепловой мощности внутри структуры преобразователя. При этом степень саморазогрева преобразователя зависит от его конструктивных особенностей и от условий окружающей среды: либо это сухой воздух, либо жидкость и т.п.

Самонагрев преобразователя приводит к появлению ошибок при измерении температуры, поскольку термистор начинает работать как источник дополнительной тепловой энергии. Самый сильный разогрев термистора наблюдается в среде стоячего воздуха. Для термисторов производители часто указывают погрешность самонагрева при работе в воздухе, стоячей жидкости и других средах. Увеличение температуры термистора относительно температуры окружающей среды можно найти при помощи приближенной формулы [2].

$$\Delta T_0 = \frac{V^2}{(\xi v c + \alpha) R} = \frac{I^2 R}{m c + \alpha},$$

где ξ - плотность массы термистора, V - объем, c - удельная теплоемкость, m - масса термистора, α - коэффициент теплопроводности (описывающий взаимосвязь с внешней средой), R - электрическое сопротивление, V - эффективное напряжение на термисторе.

Это выражение часто используется для оценки погрешности от самонагрева. Из выражения видно, что для увеличения коэффициента α необходимо обеспечивать плотный контакт термистора с объектом измерения при одновременном увеличении площади контакта, для чего можно применять теплопроводные смазочные и адгезионные вещества. С целью уменьшения погрешности самонагрева предпочтительнее использовать высокоомные термисторы с низким рабочим напряжением.

Оценку влияния самонагрева на точность измерения температуры укажем на примере поликремниевого терморезистора с параметрами: размерами кристалла - толщиной 0,5 мм, площадью 25 x 25 мкм, смещением по току 100 мкА, сопротивлением 3,9 кОм, температурным коэффициентом 0,1%/К и удельной теплопроводностью кремния 150 Вт/Км. Погрешность измерения температуры этим терморезистором в режиме постоянного рабочего тока будет иметь значение не менее 3% от измеряемой величины.

3 Самонагрев и тепловая динамика терморезистора.

В стационарных условиях датчик полностью описывается своей передаточной функцией, диапазоном измеряемых значений, калибровочными коэффициентами и т.д. однако на практике выходной сигнал датчика не всегда достаточно точно отслеживает изменение внешнего сигнала. Причины этого заключаются как в самом датчике, так и в его соединении с источником внешних

воздействий, не позволяющем сигналам распространяться с бесконечно большой скоростью. Другими словами, можно сказать, что любой датчик обладает параметрами, зависящими от времени, называемыми динамическими характеристиками. Если датчик имеет ограниченное быстродействие, он может регистрировать значения внешних воздействий, отличающиеся от реальных. Это означает, что датчик работает с динамической погрешностью. Отличие между статическими и динамическими погрешностями заключается в том, что последние всегда зависят от времени. Если датчик входит в состав измерительного комплекса, обладающего определенными динамическими характеристиками, внесение дополнительных динамических погрешностей может привести, в лучшем случае, к задержке отображения реального значения внешнего воздействия, а, в худшем случае, - к возникновению колебаний.

Время самонагрева — это время между подачей на датчик электрического напряжения или сигнала возбуждения и моментом, когда датчик начинает работать, обеспечивая требуемую точность измерений. Многие датчики обладают несущественным временем разогрева. Однако некоторые детекторы, особенно работающие в устройствах с контролируемой температурой (термостатах), для своего разогрева требуют секунды, а то и минуты.

В теории автоматического управления принято описывать взаимосвязь между входами и выходами устройства в виде линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Очевидно, что при решении таких уравнений можно определить динамические характеристики устройства. В зависимости от конструкций датчиков, уравнения, описывающие их, могут иметь разный порядок.

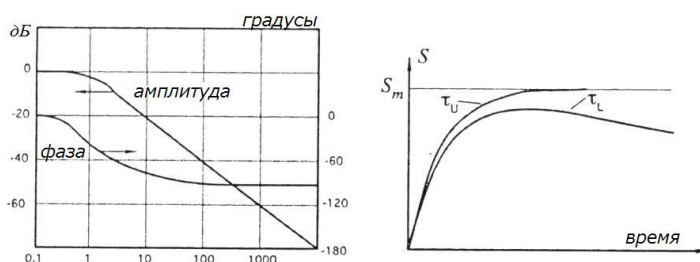
Датчики нулевого порядка, имеющие линейную передаточную функцию, относятся к устройствам мгновенного действия. Иными словами, у таких датчиков нет необходимости определять динамические характеристики.

Дифференциальные уравнения первого порядка описывают поведение датчиков, в состав которых входит один энергонакопительный элемент. Такие уравнения имеют вид:

$$b_1 \frac{dS(t)}{dt} + b_0 S(t) = s(t)$$

Типичный пример датчика первого порядка - датчик температуры, в котором роль энергонакопительного элемента играет теплоемкость для описания датчиков первого порядка существует несколько способов. Но производители датчиков для этого чаще всего используют частотные характеристики, показывающие насколько быстро датчик может среагировать на изменение внешнего воздействия. Для отображения относительного уменьшения выходного сигнала при увеличении частоты применяется амплитудночастотная характеристика, показанная на рис. 2. А. Для описания динамических характеристик датчиков часто используется граничная частота, соответствующая снижению выходного сигнала на 3 дБ, показывающая на какой частоте происходит 30% уменьшение выходного напряжения или тока.

Эта частота, часто называемая верхней частотой среза, считается предельной частотой работы датчика.



Нормализованная частота (логарифмическая шкала)

А

Б

Рис.2. Частотные характеристики:

А – частотная характеристика датчика первого порядка,

Б – частотная характеристика датчика с ограничениями по верхней частоте среза,

где τ_U и τ_L - соответствующие постоянные времени.

Частотные характеристики напрямую связаны с быстродействием датчика, выражаемого в единицах внешнего воздействия на единицу времени. Какие характеристики: АЧХ или быстродействие, используются для описания датчика, зависит от его типа, области применения и предпочтений разработчика.

Другой способ описания быстродействия заключается в определении времени, требуемого для достижения выходным сигналом датчика уровня 90% от стационарного или максимального значения при подаче на его вход ступенчатого внешнего воздействия. Для датчиков первого порядка очень удобно использовать параметр, называемый постоянной времени, равный произведению емкости на сопротивление: $\tau = CR$. В тепловых терминах под C и R понимаются теплоемкость и тепловое сопротивление. Как правило, постоянная времени довольно легко измеряется.

Временная зависимость системы первого порядка имеет вид: $S = S_m(1 - e^{-t/\tau})$, где S_m установившееся значение выходного сигнала.

Другими словами, можно сказать, что по истечении времени, равного постоянной времени, выходной сигнал датчика достигает уровня, составляющего приблизительно 63% от установившегося значения. Аналогично можно показать, что по истечении времени, равного двум постоянным времени, уровень выходного сигнала составит 86.5%, а после трех постоянных времени - 95%.

Частота среза характеризует наименьшую или наибольшую частоту внешних воздействий, которую датчик может воспринять без искажений. Верхняя частота среза показывает, насколько быстро датчик реагирует на внешнее воздействие, а нижняя частота среза - с каким самым медленным сигналом он может работать. На рис.2Б показана характеристика датчика, который имеет ограничения как по верхней, так и по нижней частоте среза. На практике для установления связи между постоянной времени датчика первого порядка и его частотой среза как верхней так и нижней, используют простую формулу: $f_c = 0,159/\tau$.

Фазовый сдвиг на определенной частоте показывает, насколько выходной сигнал отстает от внешнего воздействия (рис. 2.А). Сдвиг измеряется либо в градусах, либо в радианах и обычно указывается для датчиков, работающих с периодическими сигналами. Если датчик входит в состав измерительной системы с обратными связями, всегда необходимо знать его фазовые характеристики. Фазовый сдвиг датчика может снизить запас по фазе всей системы в целом и привести к возникновению неустойчивости.

Заключение

Фактор самонагрева особенно негативен в плане обеспечения качества метрологических характеристик и функциональной надежности измерительных преобразователей. Его последствия таковы:

- тепловая инерционность, то есть потребность в дополнительном времени выхода на установившийся тепловой режим работы преобразователя, соответствующий заданному уровню мощности измерительного сигнала;
- температурный «смаз» характеристики преобразования, то есть неуправляемый переход рабочей точки с одной характеристики на другую в температурном семействе характеристик при изменении уровня (мощности) измерительного сигнала;
- повышение порога чувствительности и общей погрешности измерения вследствие увеличения тепловых и токовых шумов преобразователя;
- влияние повышенной (избыточной) температуры первичного преобразователя на температуру измеряемой среды или объекта в точке измерения, искажающее объективность показаний;
- ускорение процесса старения структуры первичного преобразователя, интенсификация отказов в его работе и общее снижение достоверности результатов измерений.

Литература

1. *Шашков А.Г.* Терморезисторы и их применение. – М.: Энергия, 1997. – 320 с.
2. *Фрайден Дж.* Современные датчики / справочник. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
3. *Интеллектуальные сенсорные системы / под ред. Дж. К.М. Мейджера.* – М.: Техносфера, 2011. – 461 с.

4. *Кравченко А.М., Анохин А.М.* Автоматизированные медико-биологические комплексы температурной экспресс-диагностики // *Медицинская техника.* 2010. № 2. С. 21-27.